
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ LASER
ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Περιεχόμενα

- §1. Σκοπιμότητα πειραμάτων
- §2. Πως λειτουργεί ο Laser He-Ne
- §3. Βασική θεωρία πειραμάτων
- §4. Πειραματική διάταξη
- §5. Εκτέλεση πειραμάτων
- §6. Ερωτήσεις
- §7. Βιβλιογραφία

§1. Σκοπιμότητα πειραμάτων

Την ενότητα αυτή απαρτίζουν δύο χαρακτηριστικές εφαρμογές του φωτός laser. Πρόκειται για τη μεταφορά πληροφοριών πάνω στη δέσμη του laser και τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός (ή, εναλλακτικά, μέτρηση αποστάσεων).

Η ένταση της δέσμης ενός laser He-Ne μπορεί να αυξομειωθεί (διαμορφωθεί) σε σημαντικό βαθμό αν αυξομειωθεί αντίστοιχα η υψηλή τάση που εφαρμόζεται στη λυχνία του laser. Έτσι μια πληροφορία μπορεί να διαμορφωθεί κατά πλάτος τη δέσμη του laser και να μεταφερθεί με αυτόν τον τρόπο σε μεγάλες αποστάσεις, όπου με κατάλληλη απόδιαμόρφωση θα ανακτηθεί και πάλι. Η πληροφορία μπορεί να είναι μια ομιλία που με κατάλληλο μικροφωνικό στέλεχος μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό σήμα. Αυτό με τη σειρά του διαμορφώνει την υψηλή τάση και κατά συνέπεια τη δέσμη. Κατά τη λήψη, η διαμορφωμένη δέσμη ανιχνεύεται από ένα φωτοανιχνευτή. Η έξοδος του είναι μια νέα ηλεκτρονική αποτύπωση του αρχικού σήματος, που με ένα μεγαφωνικό σύστημα θα ξαναδώσει την ομιλία.

* Τη σύνταξη και επιμέλεια αυτής της ενότητας ανέλαβαν οι Ε.Λυαροκάπης και Ε.Αναστασάκης.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός, χρησιμοποιούμε ένα κάτοπτρο σε γνωστή απόσταση από τον laser (π.χ. 20m) και μετρούμε με ηλεκτρονική μέθοδο πάνω στην οθόνη ενός παλμογράφου την καθυστέρηση του φωτός για να πάει και νάρθει από το κάτοπτρο, σε σχέση με τη στιγμή εκκίνησης του φωτός από την πηγή. Αντίθετα, αν η ταχύτητα του φωτός θεωρηθεί σταθερή, τότε η ίδια μέθοδος οδηγεί στη μέτρηση της απόστασης πηγής-κατόπτρου (range finding). Η τυπική ακρίβεια των μετρήσεων και στις δύο περιπτώσεις είναι 99% και μπορεί να γίνει ακόμη καλύτερη αν αυξηθεί η απόσταση.

Και οι δύο εφαρμογές στηρίζονται στη μεγάλη ευθυγραμμικότητα του laser, και επηρεάζονται από τις συνθήκες διάδοσης (πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα μέσου, υγρασία κλπ.). Οι δυνατότητες πειραματισμού εδώ είναι άφθονες και αποτελεί πραγματική πρόκληση στη φαντασία του σπουδαστή η εκδήλωση κάποιας πρωτοβουλίας από μέρους του.

Μια και το κύριο όργανο στην ενότητα αυτή είναι ο laser αυτός καθαυτός, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί πρώτα μια σύντομη περιγραφή των αρχών λειτουργίας του laser He-Ne.

§2. Πώς λειτουργεί ο laser He-Ne

2.1 Γενικά για τη λειτουργία του laser

Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" που σημαίνουν, ενίσχυση φωτός από την εκπομπή εξαναγκασμένης ακτινοβολίας. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας δέσμης φωτός laser είναι:

- (α) Μεγάλη συγκέντρωση ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (φωτεινότητα).
- (β) Εκπομπή φωτός ορισμένης συχνότητας (μονοχρωματικότητα).
- (γ) Μικρή απόκλιση της δέσμης με την απομάκρυνση από την πηγή (ευθυγραμμικότητα).
- (δ) Χωρική και χρονική συμφωνία της δέσμης.

Οι έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας θα συζητηθούν στην παράγραφο 2.2.

Αντίθετα προς τη δέση Laser, το φως που προκαλείται από μια κοινή λάμπα βολφραμίου αποτελείται από πολλές συχνότητες (είναι περίπου λευκό), εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις και είναι χρονικά και χωρικά ασύμφωνο. Και στις δύο όμως περιπτώσεις εκπομπής φωτεινής ακτινοβολίας (από ένα Laser ή μια κοινή λάμπα) η ακτινοβολία οφείλεται στις μεταπτώσεις διεγερμένων ηλεκτρονίων από υψηλότερες σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες. Ο μηχανισμός αποδιέγερσης είναι διαφορετικός στις δύο περιπτώσεις και αυτός είναι ο λόγος που οι ιδιότητες της κάθε δέσης φωτός διαφέρουν τόσο πολύ. Ας δούμε λοιπόν πως επιτυγχάνεται η διέγερση και με ποιούς τρόπους (μηχανισμούς) γίνεται η αποδιέγερση ενός ατόμου.

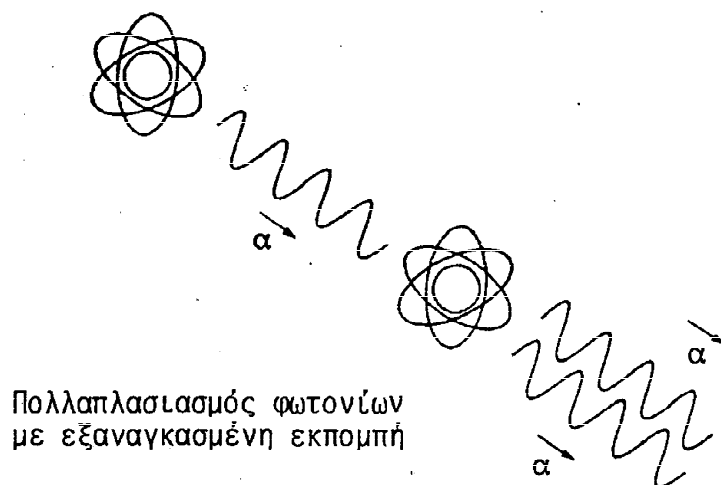
Γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου στη μόνιμη κατάστασή τους τείνουν να καταλάβουν τις ενεργειακά χαμηλότερες στάθμες αφήνοντας τις υψηλότερες κενές. Μπορούν όμως τα ηλεκτρόνια να διεγερθούν και να καταλάβουν τις υψηλότερες στάθμες αν με κάποιο τρόπο μεταβιβάσουμε αρκετή ενέργεια στο άτομο. Έτσι λ.χ. στις λυχνίες φθορισμού, η διέγερση οφείλεται στις κρούσεις των ατόμων ενώ σε μια σύνθητη λυχνία φωτισμού από βολφράμιο η διέγερση οφείλεται στη θερμότητα joule εξαιτίας του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το σύρμα. Προκειμένου για Lasers ο τρόπος παροχής ενέργειας στα ηλεκτρόνια των ατόμων ποικίλλει ανάλογα με το υλικό μέσο που χρησιμοποιείται στη λειτουργία κάθε είδους Laser. Για Laser με κρύσταλλο ρουβιδίου, η διέγερση γίνεται με ισχυρή κοινή φωτεινή πηγή. Σε ένα Laser αερίου η διέγερση γίνεται μέσω μιας υψηλής τάσης στα άκρα ενός πυκνωτή. Σ'ένα dye Laser έχουμε διέγερση μιας υγρής βαφής (dye) από το φως ενός άλλου Laser. Τα ηλεκτρόνια από τη στιγμή που θα διεγερθούν θα τείνουν να αποδιεγερθούν από μόνα τους σύμφωνα με το χαρακτηριστικό εκθετικό νόμο

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda_{12}t} \quad (4.1)$$

όπου N_0 είναι ο αριθμός των διεγερμένων ηλεκτρονίων μιας στάθμης 2 και λ_{12} είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την αρχική (2) και τελική (1) στάθμη. Εκφράζει τον αριθμό των αποδιεγέρσεων $2 \rightarrow 1$ ανά μονάδα χρόνου. Από κάθε τέτοια αποδιέγερση θα δημιουργείται ένα φωτόνιο συ-

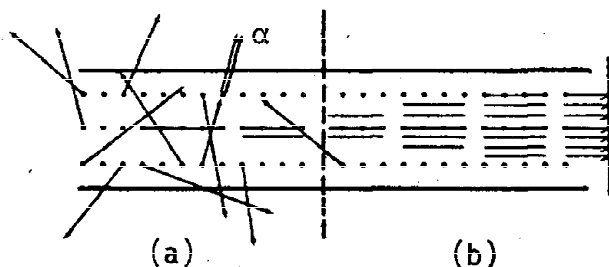
χνότητας $\omega_{12} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$, όπου $\hbar = h/2\pi$ και h η σταθερά του Planck. Αν υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος από διεγερμένα ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε ένα φάσμα ενεργειακών σταθμών τότε το πλήθος των φωτονίων που θα δημιουργηθούν από τις αποδιεγέρσεις των ατόμων θα καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων και το συνολικό φως που θα παραχθεί δεν θα είναι μονοχρωματικό. Η εκπομπή κάθε φωτονίου θα είναι τυχαία ή αυθόρμητη (spontaneous emission). Τα φωτόνια αυτά θα εκπέμπονται προς διάφορες κατευθύνσεις χωρίς καμιά συσχέτιση μεταξύ τους σε ότι αφορά τη στιγμή ή την κατεύθυνση της εκπομπής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους πολυχρωματικής εκπομπής έχουμε στο λαμπτήρα εκκένωσης Νέου. Από την ηλεκτρική εκκένωση προκαλείται διέγερση των ατόμων του Νέου και από την αποδιέγερση τους ένα σύνολο φωτονίων διαφόρων συχνοτήτων που παράγουν συνολικά λευκό φως.

Ενας άλλος μηχανισμός αποδιέγερσης των διεγερμένων ηλεκτρονίων οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ατόμων με φωτόνια μιας χαρακτηριστικής συχνότητας. Ο τρόπος αυτός αποδιέγερσης διατυπώθηκε θεωρητικά από τον Einstein το 1917 και ονομάζεται **εξαναγκασμένη εκπομπή** (stimulated emission). Σ' αυτό το μηχανισμό εκπομπής ένα φωτόνιο που έχει προκύψει από την αυθόρμητη ακτινοβολία κάποιου ατόμου σε προηγούμενη χρονική στιγμή και σε κάποια τυχαία κατεύθυνση α , αλληλεπιδρά εκλεκτικά με κάποιο διεγερμένο άτομο. Αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης-αποδιέγερσης είναι η εκπομπή ενός ακόμη φωτονίου που είναι σε φάση με το φωτόνιο που προκάλεσε την αποδιέγερση και έχει την ίδια συχνότητα με αυτό. Επιπλέον τα δύο φωτόνια κινούνται στην ίδια κατεύθυνση α (Σχ.1). Τα δύο αυτά φωτόνια μπορούν στη συνέχεια να αλληλεπιδράσουν σε άλλα δύο διεγερμένα άτομα, δημιουργώντας δύο νέα ζεύγη φωτονίων, δηλαδή συνολικά τέσσερα φωτόνια. Τα τέσσερα φωτόνια κινούνται και αυτά στην ίδια κατεύθυνση α με την ίδια συχνότητα και την ίδια φάση μεταξύ τους. Τα παραπάνω συμπεράσματα γενικεύονται λέγοντας ότι στην εξαναγκασμένη αποδιέγερση των ατόμων τα δημιουργούμενα φωτόνια κινούνται σε μια χαρακτηριστική κατεύθυνση α και είναι όλα της ίδιας συχνότητας και της ίδιας φάσης μεταξύ τους. Σε ένα σύνολο διεγερμένων ατόμων, η διαδικασία της εξανα-



Σχ.1 Δημιουργία δύο φωτονίων από την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με ένα διεγερμένο άτομο.

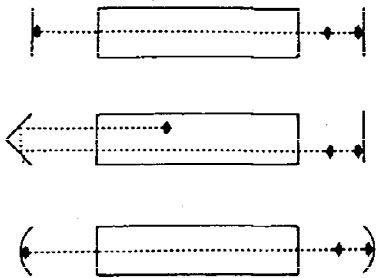
γκασμένης εκπομπής φωτονίων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλες τις κατευθύνσεις α του χώρου, αφού η αρχική αυθόρμητη εκπομπή που προκάλεσε το ξεκίνημα της εξαναγκασμένης δεν έχει περιορισμούς ως προς την κατεύθυνση. Πάντως η όλη διαδικασία είναι αναγκασμένη να εξασθενήσει σύντομα μια και τα δημιουργούμενα φωτόνια μετά από μία-δύο αλληλεπιδράσεις θα εγκαταλείπουν το χώρο των διεγερμένων ατόμων (Σχ.2α).



Σχ.2 Τυχαία και εξαναγκασμένη αποδιέγερση σε ένα χώρο με διεγερμένα άτομα.
 (α) Αυθόρμητη εκπομπή με μια εξαναγκασμένη αποδιέγερση (διπλό βέλος α).
 (β) Ενίσχυση σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Αντίθετα αν με κάποιο τεχνητό τρόπο εξαναγκάσουμε τα φωτόνια να κινηθούν μέσα από το υλικό (των διεγερμένων ατόμων) πολλές φορές, τότε είναι δυνατό να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση του φωτός σε μια κατεύ-

θυναση (Σχ.2b). Σ' αυτή την αρχή στηρίζεται η λειτουργία του Laser. Η παλινδρομική κίνηση των φωτονίων μέσα στον όγκο του διεγερμένου υλικού (**οπτική κοιλότητα**) επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση δύο κατόπτρων με εξαιρετικά υψηλή ανακλαστικότητα στα άκρα της όπως δείχνει το Σχ.3. Τα φωτόνια που δεν θα ανακλαστούν κάθετα στους δύο καθρέπτες θα ξεφύγουν από την οπτική κοιλότητα και δεν θα ενισχυθούν σημαντικά



Σχ.3 Οπτικές κοιλότητες και ανακλαστικά κάτοπτρα.

(Σχ.2a). Εκείνα που θα χτυπήσουν κάθετα στους δύο καθρέπτες θα ανακλαστούν να κάνουν πολλές παλινδρομικές διαδρομές μέσα στην οπτική κοιλότητα κι επομένως θα ενισχυθούν σημαντικά. Τα φωτόνια αυτά ξεφεύγουν προς τα έξω σαν δέσμη πια από το ένα κάτοπτρο που γι' αυτό το λόγο είναι ελάχιστα διαπερατό. Το φως που θα προκύψει θα είναι μονοχρωματικό και ευθυγραμμισμένο κάθετα

στα κάτοπτρα. Επίσης, το πιο σημαντικό, θα είναι σύμφωνο, δηλαδή τα φωτόνιά του θα είναι όλα σε φάση.

Η ποιότητα του φωτός Laser που θα δημιουργηθεί μετά από διαδοχικές ανακλάσεις στα κάτοπτρα δεν θα αυξάνει επ'άπειρο αλλά θα φτάσει σε μια οριακή τιμή που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες απωλειών. Ένας παράγοντας είναι η ανακλαστικότητα των κατόπτρων που μπορεί να φτάσει πολύ κοντά στο 100% (π.χ. στο He-Ne ως 99.99%). Επίσης μια οσοδήποτε μικρή απόκλιση από την παραλληλότητα των δύο κατόπτρων επηρεάζει σημαντικά την απόδοση. Ο πιο σημαντικός όμως παράγοντας που ορίζει την οριακή τιμή της ισχύος του Laser βασίζεται στον αριθμό των ατόμων που είναι διεγερμένα σε κάποια στάθμη και μπορούν να αποδιεγερθούν μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής. Αποδεικνύεται ότι για να προκληθεί λειτουργία Laser από τις αποδιεγέρσεις ηλεκτρονίων μεταξύ δύο σταθμών 2 και 1, θα πρέπει να υπάρχουν περισσότερα ηλεκτρόνια στην ενεργειακά υψηλότερη στάθμη 2 απ'ότι στην 1. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **αντιστροφή πληθυσμού** (population inversion). Αυτή είναι μια αναγκαία συνθήκη για να έχουμε λειτουργία Laser. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην υψηλότερη στάθμη τόσο μεγαλύτερη

απόδοση θα έχει το σύστημα. Οριακά για να διατηρήσει ο laser την απόδοση αυτή σταθερή, θα πρέπει στη μονάδα χρόνου να πραγματοποιείται ίσος αριθμός διεγέρσεων $1 \rightarrow 2$ και αποδιεγέρσεων $2 \rightarrow 1$.

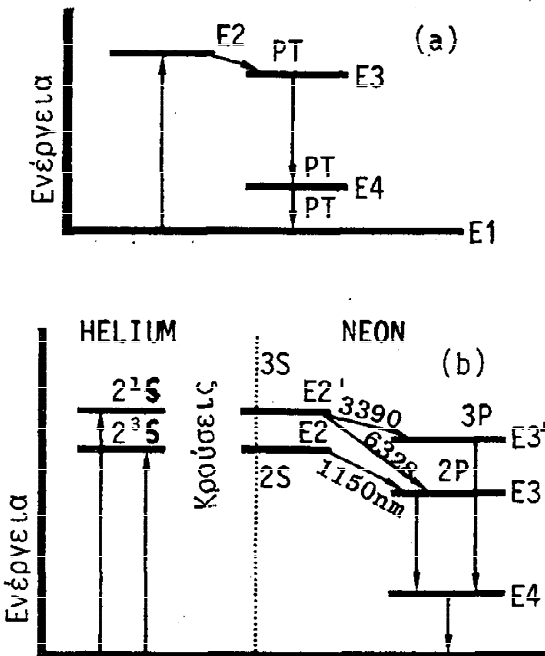
Συνήθως, για να επιτευχθεί η αντίστροφη πλήρωση των ενεργειακών σταθμών επιλέγεται ένα σύστημα που η ηλεκτρονική του δομή είναι όπως εκείνη του Σχ.4a. Το σύστημα διεγείρεται στη στάθμη 2 αρκετά εύκολα με κάποιο τρόπο διέγερσής του (άμεση διέγερση ή έμμεσα, με τη βοήθεια κάποιου άλλου ατόμου όπως π.χ. στο σύστημα He-Ne του σχήματος 4b που θα συζητηθεί πιο κάτω). Από εκεί τα ηλεκτρόνια τείνουν να μεταπέσουν στη στάθμη 3 και από κει στη θεμελιώδη στάθμη 1 απευθείας ή κατά βήματα, μέσω μιας στάθμης 4 για παράδειγμα. Μεταξύ των σταθμών 2 και 3 έχουμε αντίστροφη πλήρωση και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι μεταπτώσεις $2 \rightarrow 3$ για τη δημιουργία δέσμης φωτονίων laser με συχνότητα $\nu_{23} = (E_2 - E_3)/h$. Οι αποδιεγέρσεις τύπου PT στο Σχ. 4a, δηλώνουν ότι η αποδεσμευόμενη ενέργεια δεν εκπέμπεται σαν ακτινοβολία, αλλά απορροφάται από τα άτομα του μέσου, θέτοντάς τα έτσι σε κάποια ταλάντωση. Αν το σύστημα είναι στερεό σώμα, οι ταλαντώσεις είναι συλλογικές, έχουν κυματικό χαρακτήρα και ονομάζονται **φωνόνια** (βλ. ενότητα 6).

2.2 Χρονική και χωρική συμφωνία

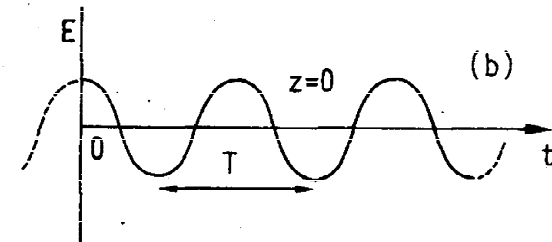
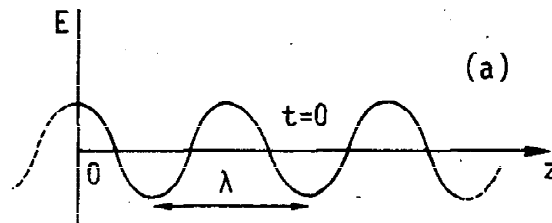
Η πιο σημαντική ιδιότητα της δέσμης laser είναι η **συμφωνία της** (coherence). Τί εννοούμε με αυτό; Ας ξεκινήσουμε με την κυματική περιγραφή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αποτελεί τη δέσμη του laser. Αν η δέσμη είναι απόλυτα μονοχρωματική (δηλαδή αν περιέχει αυστηρά μία και μόνο συχνότητα) τότε μπορούμε να την παραστήσουμε μ'ένα ημιτονικό κύμα σε άπειρη έκταση και για άπειρα χρονικά διαστήματα. Αυτό φαίνεται στα Σχ.5a,b αρκεί να φανταστούμε τους άξονες z και t να φτάνουν ως $\pm \infty$ ο καθένας. Η άμεση συνέπεια αυτού του "άπειρου" κύματος είναι ότι αν κάνουμε μια μέτρηση του E τη στιγμή $t=0$ στη θέση $z=0$ τότε μπορούμε χωρίς άλλη μέτρηση να υπολογίσουμε, κι επομένως να προβλέψουμε, την τιμή του E στην ίδια ή άλλη θέση z , την ίδια ή οποιαδήποτε άλλη παρελθούσα ή μέλλουσα χρονική στιγμή t . Η προφανής αυτή δυνατότητα οφείλεται στην αυστηρή μονοχρωματικότητα της δέσμης που μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση

$$E(z,t) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \frac{2\pi}{T} t\right), \quad (4.2)$$

όπου $\lambda = cT$ για το κενό. Το ίδιο πράγμα το εκφράζουμε λέγοντας ότι η φάση του κύματος είναι γνωστή σε όλες τις θέσεις και σε όλες τις στιγ-



Σχ.4 Διεγέρσεις και αποδिएγέρσεις ατόμων Ne (a) και μείγματος He-Ne (b)



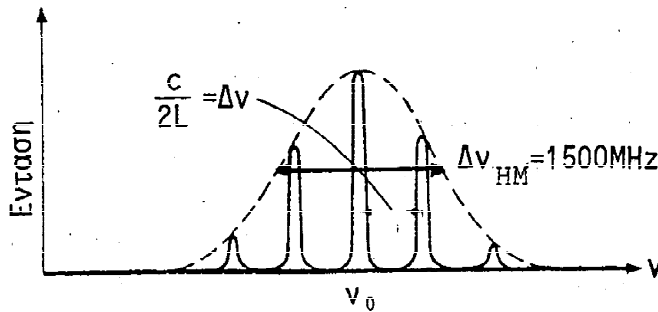
Σχ.5 Κυματική παράσταση μιας απόλυτα μονοχρωματικής δέσμης laser

μές. Ένα τέτοιο κύμα λέμε ότι χαρακτηρίζεται από **χρονική** (ή **διαμήκη**) **συμφωνία με βαθμό συμφωνίας 1** (δηλαδή 100%). Λέμε ακόμη ότι έχει **άπειρο χρόνο και μήκος συμφωνίας** ($t_c = \infty$, $\ell_c = \infty$) με την έννοια ότι η πρόβλεψη φάσης μπορεί να γίνει ακόμη και ύστερα από άπειρο χρόνο, σε άπειρα μακρινές θέσεις.

Στην πραγματικότητα, απόλυτα μονοχρωματική δέσμη laser δεν υπάρχει. Για διάφορους φυσικούς λόγους, η δέσμη περιέχει ένα λιγοστό αριθμό από ισαπέχουσες και σχεδόν αυστηρά μονοχρωματικές συχνότητες γύρω από μια κύρια τιμή ν_0 όπως δείχνει το Σχ.6. Η διαφορά τους από τη μία στην επομένη είναι σταθερή

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}, \quad (4.3)$$

όπου L η απόσταση των κατόπτρων του οπτικού αντηχείου του laser. Το πλήθος και η σχετική ένταση αυτών των "γραμμών" καθορίζεται από μια



Σχ.6 Κατανομή της έντασης των γραμμών που περιέχονται στη δέσμη laser, σύμφωνα με τη γκαουσιανή περιβάλλουσα πλάτους $\Delta\nu_{HM}$.

περιβάλλουσα καμπύλη γκαουσιανής μορφής (Σχ.6). Το ακριβές σχήμα της τελευταίας εξαρτάται από το μείγμα των αερίων, την πίεση, το χρόνο ζωής της ηλεκτρονικής μετάπτωσης που προκαλεί την ακτινοβολία laser και από ορισμένες άλλες φυσικές παραμέτρους. Το πλάτος $\Delta\nu_{HM}$ της γκαουσιανής στο μισό της μέγιστης τιμής της είναι της τάξης των 1500 MHz για τον laser He-Ne του πειράματος. Επίσης αν θεωρήσουμε ότι $L = 25\text{cm}$, η (4.3) δίνει $\Delta\nu = 600\text{MHz}$. Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή, ώστε να μην μπορεί το γυμνό μάτι να ξεχωρίζει τα αντίστοιχα "χρώματα" αυτών των γραμμών. Αντίθετα, με χρήση συμβολομέτρων Fabry-Perot είναι δυνατή η καταγραφή τους. Υπάρχουν μάλιστα ειδικές διατάξεις Fabry-Perot, με το όνομα **εταίον**, που επιτρέπουν την έξοδο από τον laser μόνο μιας τέτοιας διάκριτης γραμμής. Το αντίστοιχο πλάτος γραμμής είναι και το πρακτικό όριο μονοχρωματικότητας που μπορεί να επιτευχθεί σήμερα με τεχνικά μέσα.

Το γεγονός ότι η πραγματική δέσμη του laser δεν είναι αυστηρά μονοχρωματική αλλά χαρακτηρίζεται από κάποιο εύρος $\Delta\nu_{HM}$ έχει σοβαρή επίπτωση στη δυνατότητα πρόβλεψης φάσεων. Τώρα πια η πρόβλεψη αυτή δεν μπορεί να γίνει οπουδήποτε και οποτεδήποτε, όπως πριν, αλλά περιορίζεται μόνο σ'ένα χρονικό διάστημα ή χρόνο συμφωνίας ίσο με

$$t_c = \frac{1}{\Delta\nu_{HM}}, \tag{4.4}$$

και μόνο μέχρι απόσταση ή μήκος συμφωνίας

$$l_c = ct_c. \quad (4.5)$$

Στην περίπτωση μας με $\Delta\nu_{HM} = 1500\text{MHz}$ προκύπτει $t_c = 0.7\text{nsec}$ και $l_c = 20\text{cm}$. Η δέσμη τότε έχει βαθμό συμφωνίας μικρότερο του 1 (λιγότερο του 100%) δηλαδή είναι **μερικά μόνο σύμφωνη**.

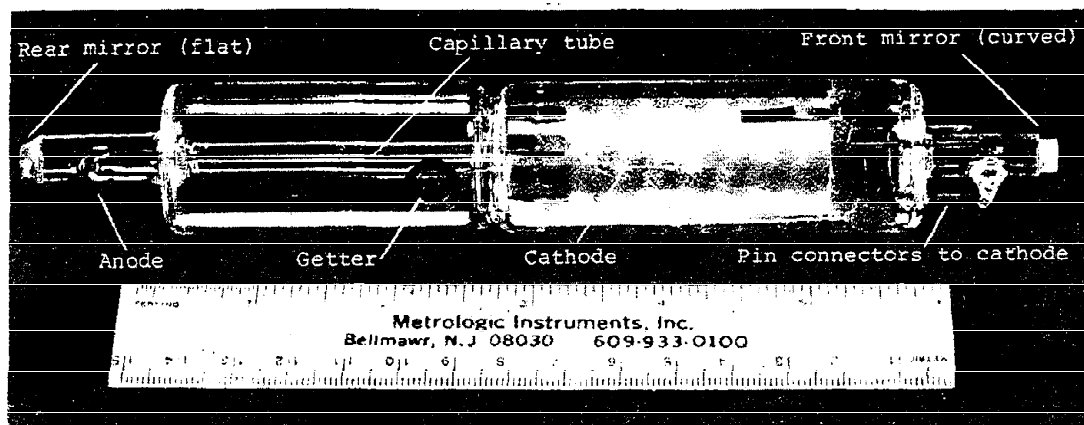
Η πιο ουσιαστική συνέπεια της μερικής συμφωνίας καταφαίνεται σ' ένα πείραμα με το συμβολόμετρο Michelson (βλ. ενότητα 3, Σχ.2). Αν η δέσμη α υποδιαιρεθεί σε δύο επί μέρους δέσμες β και γ που ξανασυναντιώνονται στην οθόνη αργότερα, αφού διανύσουν αντίστοιχες συνολικές αποστάσεις $\beta \neq \gamma$, τότε θα έχουμε δημιουργία κροσσών συμβολής λόγω της διαφοράς $\delta \equiv \beta - \gamma = 2x$, μόνον εφόσον $\delta < l_c$. Διαφορετικά οι κροσσοί εξαφανίζονται. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι αν $\delta > l_c$, τότε η β έχει καθυστερήσει ως προς την γ περισσότερο από t_c . Δηλαδή στο σημείο που η α διαχωρίστηκε στις β και γ, η β εκπέμφθηκε αργότερα από την γ κατά χρόνο μεγαλύτερο του t_c . Αυτό όμως δηλώνει ότι αν στο σημείο αυτό η φάση της γ είναι γνωστή, η φάση της β, με καθυστέρηση μεγαλύτερη του t_c , δεν μπορεί να προβλεφτεί, θα έχει τυχαία τιμή. Έτσι ο συσχετισμός φάσεων των β και γ (που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία κροσσών συμβολής) χάνεται. Προφανώς αυτή η παρατήρηση μας παρέχει μια μέθοδο για τη μέτρηση του l_c αν αυτό δεν είναι γνωστό: Αρχίζουμε να αυξάνουμε το δ από 0 ως την τιμή εκείνη δ_0 που οι κροσσοί εξαφανίζονται. Ισχύει τότε $\delta_0 = l_c$.

Οι δέσμες laser έχουν, σε σύγκριση με άλλες πηγές φωτός, πολύ μεγάλο μήκος συμφωνίας l_c , κι αυτό χάρη στη μεγάλη, έστω και μη απόλυτη, μονοχρωματικότητα (δηλαδή λόγω του μικρού $\Delta\nu_{HM}$). Οι συνήθεις πηγές φωτός που παρέχουν κάποιο μονοχρωματικό φως με τη βοήθεια ενός φίλτρου λ.χ., έχουν πολύ μεγαλύτερο $\Delta\nu_{HM}$, της τάξης του $10^6\text{MHz}(!)$ οπότε το l_c είναι της τάξης των μερικών μμ. Προφανώς ένα πείραμα Michelson θα είναι τώρα πολύ πιο δύσκολο αφού για να δούμε κροσσούς θα πρέπει να προσέξουμε η διαφορά $x = \delta/2 = (\beta - \gamma)/2$ των αποστάσεων των δύο κατόπτρων από το ΔΔ να μην ξεπερνά το ολίγα μμ. Εκτός από τη χρονική συμφωνία, που αφορά συσχετισμό φάσεων κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης δέσμης, υπάρχει και η **χωρική ή εγκάρσια συμφωνία**. Αυτή αφορά συσχετισμό φάσεων σε διαφορετικά σημεία ενός κυματικού μετώπου, για μια δεδομέ-

νη πάντοτε στιγμή. Το αντίστοιχο εγκάρσιο μήκος συμφωνίας μετριέται τώρα, όπως δηλώνει και η ονομασία του, εγκάρσια στη διεύθυνση διάδοσης.

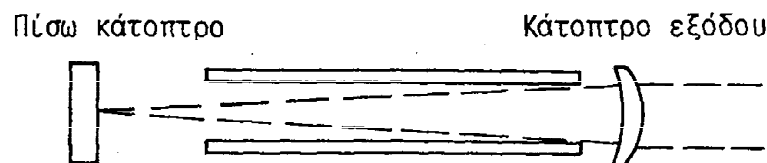
2.3 Laser He-Ne του πειράματος

Ο laser αποτελείται από ένα λεπτό γυάλινο κυλινδρικό σωλήνα μήκους 25cm, διαμέτρου 1mm που περιβάλλεται από δεύτερο γυάλινο σωλήνα (Σχ. 7). Εξω από το δεύτερο γυάλινο σωλήνα υπάρχει το ηλεκτρικό κύκλωμα που μετασχηματίζει τα 110AC ή τα 220AC της εισόδου σε συνεχή τάση 1100DC. Αυτό το υψηλό δυναμικό επιβάλλεται στα ηλεκτρόδια ανόδου-καθόδου του εσωτερικού γυάλινου σωλήνα που στο εσωτερικό του περιέχει



Σχ.7 Ανατομία του τυπικού εκπαιδευτικού laser He-Ne που χρησιμοποιείται σ' αυτό το εργαστήριο.

ένα μείγμα αερίων He (~85%), Ne (~15%) σε χαμηλή πίεση (1/300atm). Κάτω από την επίδραση του υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται, τα άτομα των δύο αερίων διεγείρονται και αποδιεγείρονται σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχ.4b, δημιουργώντας έτσι τη δέσμη laser. Αυτή είναι κόκκινη με μήκος κύματος 632.8nm (6328Å). Στα άκρα του λεπτού σωλήνα υπάρχουν δύο κάτοπτρα υψηλής ποιότητας, από τα οποία το ένα είναι επίπεδο, ανακλαστικότητας 99.99% και το άλλο κοίλο με ανακλαστικότητα 99% (Σχ.8). Το υπόλοιπο ποσοστό 1% της δέσμης διαπερνά το κοίλο κάτοπτρο εξόδου, δεξιά, και δημιουργεί τη δέσμη laser. Αυτή η εκλογή των δύο κατόπτρων (κοίλο-επίπεδο) γίνεται για λόγους καλύτερης απόδοσης και σταθερότητας σε πιθανές μικρές μηχανικές παραμορφώσεις του σωλήνα. Μολονότι δύο επίπεδα κάτοπτρα θα εξασφάλιζαν μεγαλύτερη



Σχ.8 Ο λεπτός γυάλινος σωλήνας με τα δύο κάτοπτρα.

απόδοση το όλο σύστημα θα ήταν πάρα πολύ ασταθές σε τυχαίες μικρομετακινήσεις. Από την άλλη μεριά δύο κοίλα κάτοπτρα θα έδιναν μεγαλύτερη σταθερότητα, αλλά ταυτόχρονα και μικρότερη απόδοση.

Η δέσμη του Laser δημιουργείται στον εσωτερικό κυλινδρικό σωλήνα του Laser. Ο εξωτερικός σωλήνας χρησιμεύει για να συγκρατεί τον εσωτερικό με τα ακραία κάτοπτρα σε καλή ευθυγράμμιση. Επίσης δρα σαν ένα ρεζερβουάρ αερίου που αντικαθιστά την απορροφούμενη ποσότητα αερίου από τα ηλεκτρόδια της καθόδου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του Laser.

Ουσιαστικά η λειτουργία του Laser δημιουργείται από τις αποδιεγέρσεις των ατόμων του Ne (Σχ.4b). Αποδεικνύεται ότι η πρόσμιξη Ne με αρκετή ποσότητα He πολλαπλασιάζει (περίπου 200 φορές) την απόδοση του Laser. Το He δηλαδή δρα σαν φορέας της ενέργειας από τα ηλεκτρόδια υψηλής τάσης προς τα άτομα του Ne. Τα άτομα του He και Ne που αποδιεγείρονται με αυθόρμητο τρόπο δημιουργούν το χαρακτηριστικό μπλε (He) και κόκκινο (Ne) χρώμα που διαφεύγει από τα πλάγια του σωλήνα του Laser. Αυτό δεν είναι σύμφωνο φως Laser. Είναι ασύμφωνο φως και εκπέμπεται από το "πλάσμα" των δύο αερίων. Το σύστημα δηλαδή λειτουργεί και σαν σωλήνας φθορισμού.

Το φως του Laser που προκύπτει έχει μια τυχαία φυσική πόλωση που τείνει να αλλάζει τα χαρακτηριστικά της με το χρόνο, με τρόπο μάλλον απροσδιόριστο. Η ισχύς του Laser είναι $\sim 10^3$ W και αποκτά την ικανοποιητική σταθερότητα, ύστερα από 15 περίπου λεπτά λειτουργίας. Εξαιτίας της ελαφράς μεταβολής των θέσεων του κατόπτρου (λόγω θέρμανσης του εσωτερικού σωλήνα) ο Laser δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για ευθυγραμμίσεις ακριβείας πριν περάσουν τουλάχιστον 15 λεπτά από την έναρξη λειτουργίας του.

Επίσης, παρόλο που η ένταση της δέσμης είναι μικρή δεν θα πρέπει ποτέ να μπει στα μάτια σας ή στα μάτια των συναδέλφων σας.

§3. Βασική θεωρία πειραμάτων

3.1 Διαμόρφωση κατά πλάτος (AM) της δέσμης Laser - Οπτική μετάδοση πληροφοριών

Οι Lasers He-Ne που θα χρησιμοποιηθούν στα συγκεκριμένα πειράματα αυτής της άσκησης έχουν μια πολύ ενδιαφέρουσα δυνατότητα. Μπορούμε να μεταβάλουμε την ένταση της δέσμης κατά βούληση από 85 ως 100% της μέγιστης τιμής της. Με άλλα λόγια είναι δυνατό να διαμορφώνεται η έντασή του ως 15% κατά πλάτος (AM, όχι FM) με ένα οποιοδήποτε εξωτερικό σήμα που εφαρμόζεται σε ειδικούς ακροδέκτες στο πίσω μέρος του Laser. Το σήμα μπορεί να προέρχεται από μια γεννήτρια χαμηλών συχνοτήτων, ή από ένα μικρόφωνο ή μαγνητοταινία ή και από ένα σύστημα video. Το σήμα αυτό ενισχύεται ηλεκτρονικά με ειδικό ενισχυτή που υπάρχει στο εσωτερικό του Laser και στη συνέχεια εφαρμόζεται στην άνοδο υψηλής τάσης. Έτσι η υψηλή τάση διαμορφώνεται μερικά (ως 15%) της μέγιστης τιμής της (1100DC). Αυτή με τη σειρά της προκαλεί αντίστοιχη διαμόρφωση του ρεύματος του εσωτερικού σωλήνα του Laser. Επειδή τώρα η ένταση της δέσμης (σε mW) είναι ανάλογη του ρεύματος του Laser, περιμένει κανείς ότι η ένταση της δέσμης θα είναι τελικά διαμορφωμένη κατά πλάτος σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο σήμα εισόδου. Έχουμε δηλαδή ένα εξαιρετικά υψίσυχο φορέα από την ορατή περιοχή του φάσματος (φως, σταθερού πλάτους, συχνότητας της τάξης 5×10^{14} Hz ή 6328 \AA) που διαμορφώνεται κατά πλάτος σύμφωνα με ένα αρχικό σήμα από την περιοχή ακουστικών συχνοτήτων ως την περιοχή ραδιοσυχνοτήτων (δηλαδή από 50Hz ως ~1MHz). Για σήματα ακουστικών συχνοτήτων (πλάτος ως 50mV) χρησιμοποιούμε ειδικό μικρόφωνο που συνδέεται σε αντίστοιχο ακροδέκτη (αντίσταση 60K) ενώ για σήματα video υπάρχει πρόβλεψη για σύνδεση με ακροδέκτη BNC (πλάτος 0.5V, αντίσταση 8K).

Το ύψος της διαμόρφωσης (15%) είναι αρκετό για το είδος των πειραμάτων που θα γίνουν σ'αυτή την άσκηση. Μεγαλύτερη διαμόρφωση είναι δυνατή αλλά όχι με αυτή την τεχνική. Μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει

τις λεγόμενες **κυψέλες Ροσκέϊ** ως εξωτερικούς διαμορφωτές χωρίς να πειράξει καθόλου τον laser. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο **ηλεκτροοπτικό φαινόμενο**. Η δέσμη με σταθερό πλάτος και γραμμική πόλωση οδηγείται στην κυψέλη. Αρχικά η κυψέλη είναι οπτικά ισότροπη, δηλαδή δεν αλλοιώνει την πόλωση του φωτός που περνά μέσα από αυτήν. Όταν όμως εφαρμοστεί στην κυψέλη κάποια τάση, αυτή γίνεται οπτικά ανισότροπη, δηλαδή μετατρέπει το γραμμικά πολωμένο φως σε ελλειπτικά πολωμένο. Ο βαθμός ελλειπτικότητας είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης τάσης. Αν επομένως εφαρμόσουμε στην κυψέλη ένα σήμα, αυτό θα αποτυπωθεί στην κατάσταση πόλωσης του φωτός. Συνήθως μετά την κυψέλη τοποθετείται ένας αναλύτης, κάθετα στην αρχική διεύθυνση γραμμικής πόλωσης της δέσμης, οπότε το φως που βγαίνει είναι γραμμικά πολωμένο, με ένταση που κυμαίνεται ανάλογα με το βαθμό ελλειπτικότητας. Έτσι τελικά έχουμε αποτύπωση του αρχικού σήματος πάνω στην ένταση της δέσμης laser. Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει ως 100% διαμόρφωση, είναι όμως πολύ δαπανηρή λόγω του κόστους της κυψέλης Ροσκέϊ.

Η διαμόρφωση της δέσμης είναι το ένα σκέλος του προβλήματος της μετάδοσης πληροφοριών με laser. Ο όρος "πομπός" της συμβατικής τηλεπικοινωνίας με ραδιοκύματα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κι εδώ. Το άλλο σκέλος είναι η διαδικασία λήψης της διαμορφωμένης δέσμης και η αποδιαμόρφωσή της για την ανασύσταση του ωφέλιμου σήματος (δέκτης). Εδώ η διαδικασία είναι σχετικά απλούστερη. Η δέσμη που φτάνει με το σήμα μαζί εστιάζεται πάνω σε μια **φωτοδίοδο**. Αυτή είναι ένα κατάλληλα παρασκευασμένο ημιαγωγικό υλικό που παρέχει ένα σχετικά μικρό ρεύμα όταν φωτίζεται. Αν η ένταση του φωτός που πέφτει πάνω στη φωτοδίοδο είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, το παραγόμενο ρεύμα θα είναι κι αυτό μεταβαλλόμενο με ανάλογο τρόπο. Έτσι η διαμορφωμένη δέσμη που καταλήγει στη φωτοδίοδο του δέκτη μετατρέπεται σ'ένα ηλεκτρονικό ρεύμα. Η χρονική του εξέλιξη αποτελεί πιστή αποτύπωση του αρχικού σήματος που εφαρμόστηκε στον laser του πομπού. Το ρεύμα αυτό ενισχύεται και στη συνέχεια οδηγείται σ'ένα μεγαφωνικό σύστημα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αναπαραγωγή της φωνής ή του οποιουδήποτε αρχικού σήματος. Φυσικά, η δέσμη που φτάνει στη φωτοδίοδο, εκτός από το ωφέλιμο σήμα περιέχει και μια σταθερή συνιστώσα έντασης, το αδιαμόρφωτο 85%. Η αντί-

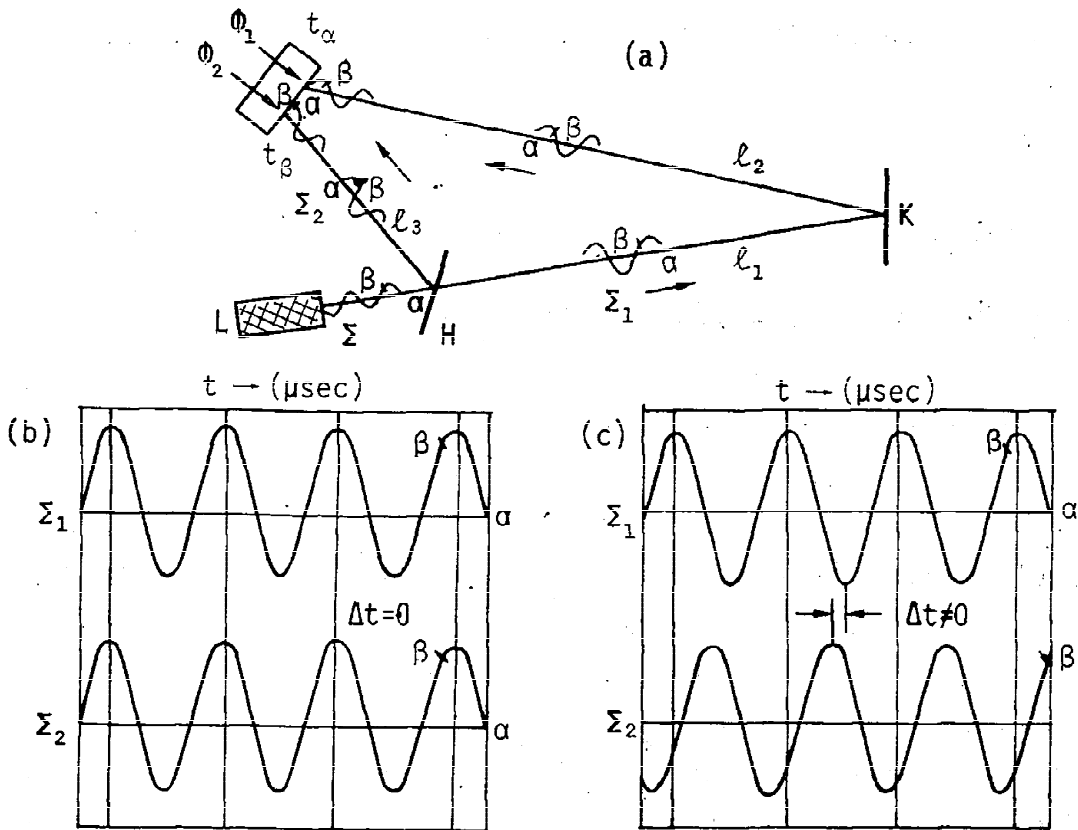
στοιχη συνιστώσα στο ηλεκτρονικό ρεύμα της φωτοδιόδου εξουδετερώνεται ηλεκτρονικά σ'ένα μεγάλο βαθμό πριν φτάσει στο μεγάφωνο. Έτσι αποφεύγεται η παραγωγή ενός άχρηστου σταθερού "θορύβου υποστρώματος" (παράσιτα) που λόγω της μεγάλης του έντασης είναι δυνατό να καλύπτει το ωφέλιμο σήμα.

3.2 Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

Το δεύτερο μέρος σ'αυτή την άσκηση αφορά τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται το φως για να καλύψει μια γνωστή απόσταση. Η απόσταση μπορεί να είναι 20m ή περισσότερο. Η άσκηση επομένως πρέπει να γίνει σ'ένα ευρύχωρο εργαστήριο ή ένα μακρύ διάδρομο. Συνήθως η αναγκαία απόσταση υποδιπλασιάζεται με τη χρήση ενός κάτοπτρου. Συγκεκριμένα, το φως της δέσμης του laser συναντά το κάτοπτρο σε απόσταση l (π.χ. 10m), ανακλάται και ξαναγυρνά στο χώρο του laser, έχοντας καλύψει απόσταση $2l$. Ο χρόνος για τη διαφορά $2l$ μετριέται ηλεκτρονικά με σχετική ακρίβεια, χάρη στις ιδιότητες της διαμορφωμένης δέσμης laser. Η διαμόρφωση γίνεται με εξωτερικό σήμα συχνότητας 1MHz που εφαρμόζεται στον laser, όπως ακριβώς συζητήθηκε στην παράγραφο 3.1. Η αρχή λειτουργίας φαίνεται παραστατικά στο Σχ.9α.

Ας παρακολουθήσουμε την πορεία ενός τμήματος Σ του συνεχούς κυματοσυρμού της διαμορφωμένης δέσμης που φεύγει από τον laser. Προσοχή, το ημιτονικό σχήμα του Σ δεν οφείλεται στη συχνότητα του φωτός 2×10^{14} Hz! Επίσης δεν θα πρέπει να γίνει σύγχυση ανάμεσα στα περί χρόνου και μήκους συμφωνίας (βλ. 2.2) και στη συζήτηση που ακολουθεί. Ας πάρουμε δύο αυθαίρετα σημεία αναφοράς πάνω στον Σ , το α και β . Αυτά έχουν κάποια διαφορά φάσης μεταξύ τους, ή διαφορετικά, το α προηγείται του β κατά χρόνο Δt .

Μπροστά στον laser υπάρχει ένα ημιδιαφανές κάτοπτρο H που διαχωρίζει τον Σ σε δύο νέους συρμούς τον Σ_1 και τον Σ_2 . (Τα σημεία α , β διατηρούνται στους Σ_1 , Σ_2 .) Ο Σ_1 περνά από το H καλύπτει την απόσταση l_1 ως το κάτοπτρο K , ανακλάται καλύπτει τη νέα απόσταση l_2 και καταλήγει σε μια φωτοδίοδο Φ_1 . Η Φ_1 μετατρέπει το σήμα σε ηλεκτρονικό παλμό που



Σχ.9 (a) Αναπαράσταση της διαδικασίας για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός (ή της απόστασης l_1). L: laser. H: ημιδιαφανές κάτοπτρο. Φ_1, Φ_2 : φωτοδιόδου. $\Sigma, \Sigma_1, \Sigma_2$: κυματοσυρμοί.
 (b) Εικόνα των κυματοσυρμών Σ_1, Σ_2 όταν $l_1 + l_2 \approx l_3$.
 (c) Εικόνα των κυματοσυρμών Σ_1, Σ_2 όταν $l_1 + l_2 \gg l_3$.

στη συνέχεια μεταφέρεται σχεδόν ακαριαία στην οθόνη ενός παλμογράφου (κανάλι 1). Η ημιτονική κυματομορφή Σ_1 των Σχ.9b,c δείχνει την εικόνα αυτή που υποτίθεται ότι σχηματίζεται τη στιγμή της αρχικής άφιξης του σημείου α του κυματοσυρμού Σ_1 , στο δεξιό άκρο της οθόνης.

Να δούμε τώρα τι γίνεται με το συρμό Σ_2 . Αυτός δημιουργείται από ανάκλαση τμήματος του Σ πάνω στη Η. Καλύπτει τη μικρή απόσταση l_3 και καταλήγει σε μια δεύτερη φωτοδίοδο Φ_2 που είναι τοποθετημένη πολύ κοντά στην Φ_1 . Η Φ_2 είναι συνδεδεμένη με το κανάλι 2 του ίδιου παλμογράφου, έτσι ώστε κάθε στιγμή να έχουμε στην οθόνη και την εικόνα του Σ_2 .

Αν το κάτοπτρο ήταν σε πολύ μικρή απόσταση ώστε να ισχύει σε ικανοποιητική προσέγγιση $l_3 \approx l_1 + l_2$, τότε προφανώς το σημείο α του Σ_1 θα έφτανε στην Φ_1 ταυτόχρονα με το σημείο α του Σ_2 . Έτσι οι κυματομορφές

των Σ_1 , Σ_2 πάνω στην οθόνη του παλμογράφου θα ήταν εντελώς παράλληλες ως προς τον άξονα του χρόνου, όπως δείχνει το Σχ. 9b, δηλαδή θα είχαν την ίδια φάση. (Σημειώνουμε ότι ο οριζόντιος άξονας της οθόνης παριστάνει χρόνο και μάλιστα σε μονάδες $\mu\text{sec} = 10^{-6} \text{sec.}$)

Στη συνέχεια θεωρούμε την περίπτωση που το κάτοπτρο είναι αρκετά μακριά δηλαδή ισχύει $l_3 \gg l_1 + l_2$. Προφανώς τώρα ο Σ_1 καθυστερεί ως προς τον Σ_2 κι όταν το σημείο α του Σ_1 φτάνει στην Φ_1 , το αντίστοιχο σημείο α του Σ_2 έχει ήδη φτάσει στη Φ_2 , ενώ κάποιο άλλο σημείο του Σ_2 (π.χ. το β) μεταγενέστερο του α συμβαίνει να φτάνει στη Φ_2 ταυτόχρονα με το α του Σ_1 (στη Φ_1). Η εικόνα των δύο κυματομορφών στην οθόνη του παλμογράφου είναι εκείνη του Σχ. 9c. Η διαφορά χρόνου $\Delta t = t_\alpha - t_\beta$ οφείλεται στη διαφορά μήκους διαδρομής. Άρα ισχύει

$$l_1 + l_2 - l_3 = c\Delta t. \quad (4.2)$$

Το Δt μπορεί να μετρηθεί απευθείας (πάνω στην οθόνη), όπως και τα l_1 , l_2 , l_3 με ανεξάρτητη μέτρηση. Συνήθως ισχύει $l_3 \ll l_1 \approx l_2$ οπότε η (4.2) γίνεται $2l_1 = c\Delta t$.

Είναι προφανές ότι η ακρίβεια στη μέτρηση των αποστάσεων και του Δt παίζει αποφασιστικό ρόλο στην ακρίβεια μέτρησης του c . Ενδεικνύται η επανάληψη των μετρήσεων πολλές φορές ως και η συστηματική ανάλυση των σφαλμάτων. Το τελικό σφάλμα δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 5%.

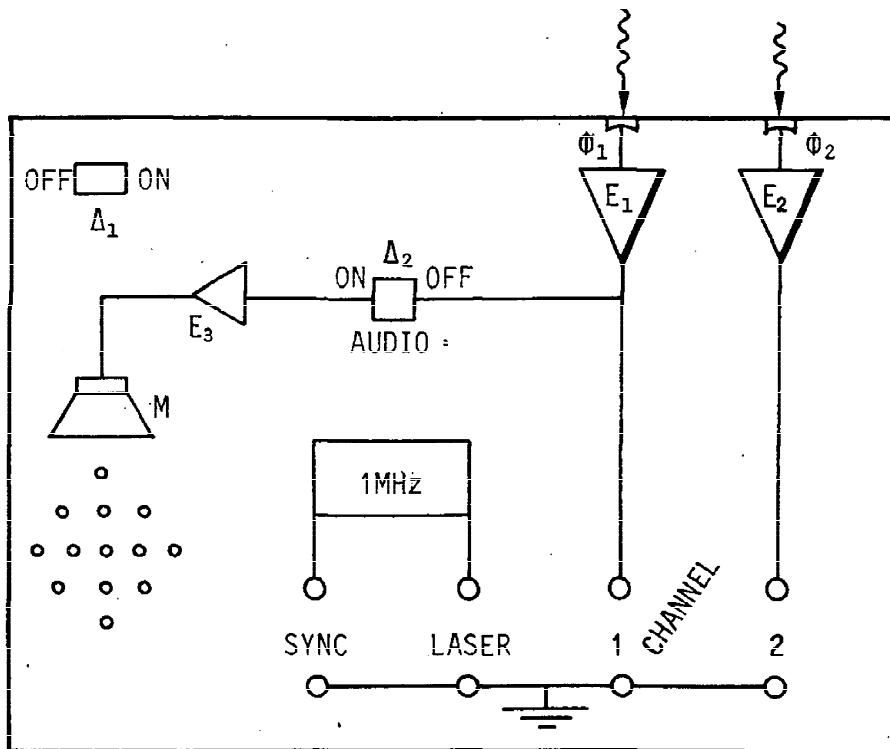
Ενας προφανής έλεγχος για τη σωστή διάταξη είναι να τοποθετηθεί το K πολύ κοντά στις Φ_1, Φ_2 οπότε θα πρέπει να προκύψει $\Delta t = 0$, όπως ήδη συζητήθηκε. Αντίθετα, όσο πιο μεγάλη είναι η l_1 τόσο το σχετικό σφάλμα στη μέτρηση του Δt θα είναι μικρότερο.

Εύκολα η διάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση αποστάσεων, θεωρώντας ότι το c είναι γνωστό. Χρειάζεται πάντως λίγη προσοχή (ίσως και λίγη γεωμετρία ή και τριγωνομετρία) για το συσχετισμό της l_1 με την l_2 ώστε το αποτέλεσμα να είναι όσο γίνεται πιο σωστό. Το σφάλμα εδώ περιορίζεται κάπως γιατί το c είναι γνωστό με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι παραμένει μόνο το σφάλμα στη μέτρηση του Δt .

§4. Πειραματική διάταξη

Η έμφαση στην ενότητα αυτή δεν είναι τόσο οι φυσικές έννοιες των δύο προβλημάτων της όσο η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπισή τους. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εφαρμογή των μεθόδων αυτών περιλαμβάνει τα εξής:

1. Laser με δυνατότητα διαμόρφωσης της δέσμης σε πλάτος. Πρόκειται για τον Laser He-Ne που αναφέρθηκε στην §2.3 ισχύος 0.9mW και με εξωτερικό μετασχηματιστή 220 → 110AC. Στο πίσω μέρος πλάϊ στο διακόπτη ON-OFF, υπάρχει μια υποδοχή MIC για τη σύνδεση του μικροφώνου και μια δεύτερη, τύπου BNC, για τη σύνδεση με γεννήτριες υψίσυχνων σημάτων (π.χ. video κλπ. συχνότητας ως 1MHz). Η ενίσχυση του σήματος και διαμόρφωση της δέσμης γίνεται εσωτερικά και δεν μας ενδιαφέρουν οι τεχνικές λεπτομέρειες. Σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να ξεβιδωθεί το μεταλλικό περίβλημα του laser. Αμέσως από κάτω του υπάρχουν επικίνδυνα υψηλές τάσεις.
2. Το "μαύρο κουτί" των ηλεκτρονικών. Όλα τα ηλεκτρονικά που χρειάζονται στην ενότητα αυτή είναι μαζεμένα σε μια συσκευή διαστάσεων $17.5 \times 13.5 \times 6 \text{ cm}^3$. Το περιεχόμενό της δεν μας ενδιαφέρει από την άποψη ηλεκτρονικών λεπτομερειών. Γι' αυτό ακριβώς παίρνει το συμβολικό όνομα "μαύρο κουτί" που δεν σημαίνει βέβαια ότι το χρώμα του είναι αναγκαστικά μαύρο, αλλά ότι στο εσωτερικό του επιτελούνται ορισμένες γνωστές λειτουργίες, άγνωστο (και αδιάφορο) πως! Το μαύρο κουτί φαίνεται στο Σχ.10 και περιλαμβάνονται σ' αυτό τα εξής:
 - (i) Δύο φωτοδιόδοι Φ_1, Φ_2 . Εσωτερικά ακολουθούνται από δύο ενισχυτές E_1, E_2 οι έξοδοι των οποίων είναι οι υποδοχές CHANNEL 1 και CHANNEL 2 αντίστοιχα (κανάλια 1,2). Ειδικά η έξοδος του E_1 οδηγείται εσωτερικά και σ' ένα τρίτο ενισχυτή χαμηλών συχνοτήτων (E_3) που η έξοδός του καταλήγει στο μεγάφωνο M. Η ενεργοποίηση του E_3 ελέγχεται με τον διακόπτη Δ_2 .
 - (ii) Ένα μεγάφωνο M των 8 Ohm για την αναπαραγωγή ακουστικών σημάτων.
 - (iii) Μια γεννήτρια ημιτονικού σήματος συχνότητας 1MHz. Το σήμα



Σχ.10 Το μαύρο κουτί. Φ_1 , Φ_2 : φωτοδιόδου 1 και 2. CHANNEL 1,2: έξοδοι των ενισχυτών E_1 , E_2 των σημάτων που φτάνουν στις Φ_1 , Φ_2 . LASER: σήμα 1MHz για τη διαμόρφωσή του. SYNC: υποδοχές για σύνδεση με το EXTERNAL TRIGGERING του παλμογράφου. M: μεγάφωνο. Δ_1 , Δ_2 : διακόπτες.

αυτό θα ληφθεί από τις υποδοχές LASER και θα χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση laser στη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός.

(iv) Οι ακροδέκτες SYNC πρέπει να οδηγηθούν στον ακροδέκτη BNC του παλμογράφου με την ένδειξη EXTERNAL TRIGGERING.

(v) Μια μπαταρία των 9νοϊτ για την τροφοδοσία των παραπάνω κυκλωμάτων. Το μαύρο κουτί ενεργοποιείται με το διακόπτη Δ_1 .

3. Παλμογράφος δύο καναλιών με χρονική κλίμακα ως 0.1μsec και κατά προτίμηση, με δυνατότητα για EXTERNAL TRIGGERING. Η βασική χρήση του παλμογράφου θα πρέπει να θεωρείται γνωστή.
4. Ένα μικρόφωνο (αντίσταση 60K) και τέσσερα καλώδια με ακροδέκτες BNC από τη μια άκρη και "μπανάνες" από την άλλη (μια κόκκινη και μια μαύρη το καθένα).

5. Οπτικά εξαρτήματα όπως ένα ημιδιαφανές κάτοπτρο (50%), τέσσερα μαγνητικά στηρίγματα και δύο μαγνητικές βάσεις (βλ. επίσης ενότητα 2), δύο φακοί με $f=5''=12.7\text{cm}$, ένα κάτοπτρο ($7.6 \times 10.2\text{cm}^2$), κι άλλο ένα στρογγυλό σε σύστημα με κοχλίες για οριζόντιο και κατακόρυφο έλεγχο.
6. Μεταλλική πλάκα για τη στήριξη του laser και του μαύρου κουτιού.

§5. Εκτέλεση πειραμάτων

5.1 Απαραίτητα όργανα και εξαρτήματα

- Laser He-Ne, έντασης 0.9mW με δυνατότητα διαμόρφωσης δέσμης κατά πλάτος.
- "Μαύρο κουτί" ηλεκτρονικών (βλ. §4).
- Παλμογράφος δύο καναλιών με EXTERNAL TRIGGERING.
- Ένα μικρόφωνο και τέσσερα καλώδια.
- Δύο φακοί $f=12.7\text{cm}$.
- Δύο κάτοπτρα με σύστημα στήριξης και προσανατολισμού.
- Ένα ημιδιαφανές κάτοπτρο (50%).
- Τέσσερα μαγνητικά στηρίγματα και δύο μαγνητικές βάσεις.
- Μεταλλική πλάκα για τοποθέτηση των παραπάνω οργάνων.

5.2 Κρίσιμες οδηγίες

- Μην αφήνετε τη δέσμη laser να μπει στα μάτια σας ή τα μάτια των συναδέλφων σας, απευθείας ή ύστερα από ανάκλαση.
- Προσοχή στις πρίζες και άλλες ηλεκτρικές συνδέσεις.
- Να μην ξεβιδωθεί το μεταλλικό περίβλημα του laser ή του μαύρου κουτιού σε καμιά περίπτωση. Αν το μαύρο κουτί χρειάζεται μπαταρίες, ρωτήστε τον επιβλέποντα.
- Χειρίζεστε με εξαιρετική προσοχή τους διακόπτες και τις συνδέσεις του μαύρου κουτιού και του παλμογράφου. Μην προβαίνετε σε καμιά ε-

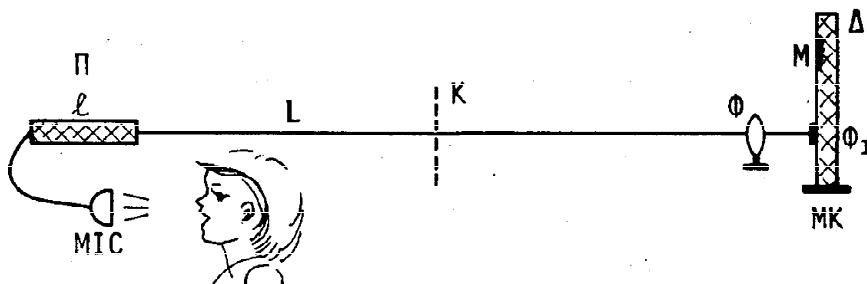
νέργεια αν δεν είστε βέβαιοι(ες) για το τι κάνετε. Να θυμάστε ότι τόσο το μαύρο κουτί όσο και ο παλμογράφος περιέχουν πολύ ευαίσθητα ηλεκτρονικά και ότι η παραμικρή άστοχη επέμβαση μπορεί να τα κάψει. Μην διστάζεται να ρωτάτε τον επιβλέποντα για οτιδήποτε σχετικά με τη χρήση τους.

- Μην αγγίζεται με τα χέρια σας τις ευαίσθητες επιφάνειες των κατόπτρων και των φακών. Αν χρειάζεται καθάρισμα ρωτήστε τον επιβλέποντα.
- Φεύγοντας βεβαιωθείτε ότι **όλα** τα όργανα είναι σβηστά.

5.3 Οπτική μετάδοση πληροφοριών

Στην πράξη κάθε ομάδα σπουδαστών (2-4 άτομα) θα έχει στη διάθεσή της μια πλήρη διάταξη δηλαδή, laser, μαύρο κουτί, παλμογράφο και λοιπά εξαρτήματα. Σε κάποια απόσταση (π.χ. 20-40 μέτρα) θα υπάρχει μια δεύτερη ομάδα ανάλογα εξοπλισμένη. Οι δύο ομάδες θα συνεργάζονται με την έννοια ότι η δέσμη του laser της μιας θα καταλήξει στα ηλεκτρονικά της άλλης κι αντίστροφα. Έτσι η κάθε ομάδα θα είναι συγχρόνως πομπός και δέκτης. Η διάταξη "σε μια κατεύθυνση" φαίνεται στο Σχ. 11. Είναι ιδιαίτερα απλή, αλλά χρειάζεται λίγη προσοχή στη σωστή ευθυγράμμιση.

- Τοποθετείστε τον laser πάνω στη μεταλλική πλάκα στο χώρο του πομπού Π και στηρίξτε τον με δύο μαγνητικές βάσεις. Ανάψτε τον και κατευθύνετε τη δέσμη του οριζόντια προς το χώρο του δέκτη Δ.
- Συνδέστε το μικρόφωνο με τον laser (υποδοχή MIC). Από δω και πέρα



Σχ.11. Διάταξη για την οπτική μετάδοση πληροφοριών. Π: πομπός. Δ: δέκτης. l: laser. MIC: μικρόφωνο. MK: μαύρο κουτί. Φ: φακός. Μ: μεγάφωνο. Φ₁: φωτοδίοδος. Κ: κάτοπτρο για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός.

- χρειάζεται αρκετή ησυχία γιατί το σύστημα "πιάνει" όλο το θόρυβο και είναι ενδεχόμενο να υπερφορτίζονται τα ηλεκτρονικά.
- Στην πλευρά του δέκτη τοποθετήστε το μαύρο κουτί όρθιο πάνω στη μεταλλική πλάκα και στηρίξτε το με δύο μαγνητικές βάσεις. Προσανατολίστε το προς την κατεύθυνση του laser.
 - Με σύγχρονους χειρισμούς από την πλευρά του πομπού και του δέκτη προσπαθήστε να φέρετε τη δέσμη πάνω στην επιφάνεια του μαύρου κουτιού και μάλιστα στην περιοχή της φωτοδιόδου 1. Ασφαλώς η δέσμη θα έχει ανοίξει αρκετά (2-6cm διάμετρος).
 - Τοποθετήστε ένα φακό ($f=12.7\text{cm}$) με χρήση μαγνητικού στηρίγματος προς από την Φ_1 σε απόσταση περίπου 12.7cm από αυτή έτσι ώστε η δέσμη να εστιαστεί πάνω στην Φ_1 . Το σύστημα τώρα είναι ευθυγραμμισμένο στη μία διεύθυνση. Επαναλάβετε και προς την αντίθετη διεύθυνση.
 - Ανοίξτε τους διακόπτες Δ_1 και Δ_2 . Οι δύο ομάδες είστε τώρα έτοιμες για συζήτηση. Μιλάτε στο μικρόφωνό σας και σας ακούν οι απέναντι. Χρειάζεται ησυχία κι από τις δύο πλευρές. Η ένταση της φωνής να είναι χαμηλή προς μέτρια ώστε να μην ακούγεται απευθείας!
 - Αν δεν ακούτε ήχο από το μεγάφωνο του μαύρου κουτιού ελέγξτε τους Δ_1 , Δ_2 τις ηλεκτρονικές συνδέσεις και την οπτική ευθυγράμμιση, ιδιαίτερα την εστίαση της δέσμης πάνω στην Φ_1 . Με μικρές κινήσεις του φακού μπορείτε να επαναφέρετε τη δέσμη πάνω στην Φ_1 .
 - Αν ο ήχος του μεγαφώνου είναι πολύ ισχυρός ο πομπός θα πρέπει να μειώσει την ένταση του σήματος. Μια ένδειξη για υπερβολικά υψηλό σήμα είναι παράσιτα στη λήψη ή αναβοσβύσιμο της έντασης της δέσμης.
 - Καθώς μεταδίδεται το μήνυμα, διακόψτε τη δέσμη με το χέρι σας πριν από το φακό. Βεβαιωθείτε ότι ο ήχος από το μεγάφωνο σταματά.
 - Δοκιμάστε όλοι και όλες να μεταδώσετε το μήνυμά σας. Πως σας φαίνεται η φωνή των συναδέλφων σας με οπτική διαμόρφωση; Τους αναγνωρίζετε; Πως θ'ακούσετε τη δική σας φωνή;

5.4 Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

Αν στη θέση Κ του Σχ.11 τοποθετηθούν δύο στρογγυλά κάτοπτρα, ένα για την κάθε ομάδα, η διάταξη του Σχ.9a είναι σχεδόν έτοιμη. Εδώ οι δύο ομάδες εργάζονται ανεξάρτητα.

- Κατευθύνετε τη δέσμη του Laser προς το στρογγυλό κάτοπτρο και ρυθμίστε τον προσανατολισμό του με τους δύο κοχλίες οριζόντιου και κατακόρυφου ελέγχου ώστε η ανακλώμενη να φτάνει στο χώρο του Laser.
- Τοποθετήστε το μαύρο κουτί πλάι στο Laser (20-30cm) έτσι ώστε οι Φ_1 , Φ_2 να βλέπουν το κάτοπτρο 10° - 30° αριστερά τους.
- Εστιάσετε με τον ένα φακό την ανακλώμενη δέσμη πάνω στην Φ_1 .
- Τοποθετήστε 5-15cm μπρος από την έξοδο του Laser το ημιδιαφανές κάτοπτρο, έτσι ώστε η ανακλώμενη από αυτό να πλησιάζει την Φ_2 . Χρησιμοποιήστε για τη στήριξη αυτή ένα μαγνητικό στήριγμα και μια μαγνητική βάση έτσι ώστε να έχετε δυνατότητα προσανατολισμού του ως προς δύο άξονες κάθετους μεταξύ τους.
- Πολύ προσεκτικά τώρα εστιάσετε με το δεύτερο φακό τη δέσμη από το ημιδιαφανές κάτοπτρο πάνω στην Φ_2 . (Ο δεύτερος αυτός φακός δεν είναι αναγκαίος γιατί η δέσμη είναι πολύ συγκεντρωμένη, χρησιμοποιείται όμως κυρίως για λόγους ομοιομορφίας των δύο δεσμών). Τώρα η γεωμετρία του Σχ.9a είναι έτοιμη.
- Πραγματοποιήστε τις ακόλουθες συνδέσεις (Σχ.10):
 CHANNEL 1 → Κανάλι 1 του παλμογράφου
 CHANNEL 2 → Κανάλι 2 του παλμογράφου
 LASER → Ακροδέκτης BNC του Laser
 SYNC → EXTERNAL TRIGGERING του παλμογράφου
 Παλμογράφος: ανοικτός (ON)
 Δ_2 : κλειστός (OFF)
 Δ_1 : ON
- Ρυθμίστε τον παλμογράφο ώστε να έχετε στην οθόνη τις δύο ημιτονοειδείς κυματομορφές. Ίσως χρειαστεί να επέμβετε στις εξής λειτουργίες:

EXTERNAL TRIGGERING: ρύθμιση ώσπου να φανούν οι δύο εικόνες

CHANNEL 1: λαμπρότητα εικόνας

ευκρίνεια εικόνας

κατακόρυφη ρύθμιση

οριζόντια ρύθμιση

κλίμακα 1Volt

χρόνος 0.1 ή 0.2μsec.

CHANNEL 2: ίδιες ρυθμίσεις όπως στο CHANNEL 1.

- Βεβαιωθείτε ότι ελέγχετε τις εικόνες και ότι η οπτική ευθυγράμμιση δεν έχει χαλάσει. Κατανοήστε τη βαθμονόμηση του οριζόντιου άξονα της οθόνης. Αν τα ύψη των δύο κυματομορφών δεν είναι ίσα, προσπαθήστε να τα κάνετε ίσα είτε με καλύτερη ευθυγράμμιση των δύο δεσμών είτε από τις κλίμακες (Volt/cm) του παλμογράφου.
- Ποιά είναι η περίοδος των κυματομορφών, σύμφωνα με την εικόνα τους στην οθόνη; Από την περίοδο που μετρήσατε υπολογίστε τη συχνότητα σε MHz. Πόση περιμένετε ότι θα είναι και πόση βρίσκετε ότι είναι από τη μία και την άλλη κυματομορφή; Εξηγήστε τυχόν διαφορές και επαναλάβετε τη μέτρηση σε δύο τουλάχιστο διαφορετικές κλίμακες του διακόπτη χρόνου του παλμογράφου.
- Κάνετε κανονική ανάλυση σφαλμάτων και αποφανθείτε ποιά είναι η τελική, πραγματική βαθμονόμηση του άξονα του χρόνου του παλμογράφου, κρίνοντας από το (γνωστό) σήμα με το οποίο τροφοδοτήσατε τα δύο κανάλια του.
- Τί διαφορά φάσης μετράτε ανάμεσα στις δύο κυματομορφές; Σε τί μονάδες είναι αυτή; Λάβετε υπόψη σας τη βαθμονόμηση του προηγούμενου ερωτήματος. Πόσο είναι το Δt ;
- Μετρήστε με μέτρο ή μετροταινία τις αποστάσεις l_1 , l_2 , l_3 (Σχ.9a). Τί ακρίβεια έχουν οι μετρήσεις σας;
- Υπολογίστε την ταχύτητα του φωτός και συγκρίνετέ την με τη γνωστή τιμή. Τί σφάλμα έχει η μέτρησή σας;
- Υπολογίστε θεωρητικά το σφάλμα στην ταχύτητα του φωτός, χρησιμοποιώντας τα σφάλματα στις μετρήσεις των Δt , l_1 , l_2 , l_3 .

- Αν χρειαστεί επαναλάβετε όλες τις μετρήσεις με την ίδια ή διαφορετική θέση του κατόπτρου K.
- Τοποθετήστε το ορθογώνιο κάτοπτρο μπρος από τον laser, αμέσως μετά το ημιδιαφανές κάτοπτρο. Χρησιμοποιήστε για τη στήριξή του ένα μαγνητικό στήριγμα και μια μαγνητική βάση έτσι ώστε να έχετε δυνατότητα ελέγχου του προσανατολισμού του. Ευθυγραμμίστε τις δέσμες και μετρήστε το Δt_0 τώρα. Πόσο είναι; Πόσο πρέπει να είναι;
- Αν στην προηγούμενη μέτρηση το Δt_0 δεν είναι μηδέν τότε θα πρέπει να το συνυπολογίσετε στον καθορισμό του ολικού Δt . Συγκεκριμένα, αν Δt_0 και Δt_L είναι οι μετρήσεις του Δt με το κάτοπτρο κοντά (0) και μακριά (L) αντίστοιχα, τότε το ολικό Δt θα είναι $\Delta t_L - \Delta t_0$. Προσοχή στα αλγεβρικά σημεία των Δt_L , Δt_0 . Πόσο θα επηρεαστεί το σφάλμα των μετρήσεών σας σε μια τέτοια περίπτωση;
- Θεωρήστε το c γνωστό και μετρήστε την απόσταση του κατόπτρου από τον laser. Πόσο σφάλμα υπάρχει στη μέτρησή σας;
- Σβήστε τον Δ_1 και τον παλμογράφο. Απόσυνδέστε τα καλώδια. Τακτοποιήστε όλα τα όργανα και τα εξαρτήματα πάνω στη μεταλλική πλάκα.

§6. Ερωτήσεις

- Εξηγήστε τους όρους διέγερση, αποδιέγερση ατόμου, θεμελιώδης κατάσταση, χρόνος ημιζωής, αυθόρμητη και εξαναγκασμένη ακτινοβολία, σύμφωνο και ασύμφωνο φως, μήκος και χρόνος συμφωνίας. Υπολογίστε το μήκος και χρόνο συμφωνίας του laser του πειράματός σας. Να μη ξεβιδώσετε το μεταλλικό περίβλημα του laser, και να μην κοιτάξετε τη δέσμη κατάματα!
- Γιατί μια λάμπα φθορισμού δεν ακτινοβολεί όπως ένα laser;
- Με ποιές φυσικές και τεχνικές προϋποθέσεις έχουμε συντηρούμενη ακτινοβολία laser;
- Μελετήστε λεπτομερειακά το ενεργειακό διάγραμμα που παίζει ρόλο στη λειτουργία του laser He-Ne των πειραμάτων σας. Ποιά είναι η συγκεκριμένη αποδιέγερση που μας ενδιαφέρει και ποιά το μήκος κύματός της;

- Υπάρχουν άλλες αποδιεγέρσεις που παράγουν φως Laser; Τί συχνότητα και χρώμα έχουν οι αντίστοιχες δέσμες; Είναι ορατές; Με τί προϋποθέσεις θα μπορούσαμε να τις έχουμε αυτές τις δευτερεύουσες δέσμες;
- Θυμηθείτε τη σημασία της γωνίας Brewster. Πώς θα μπορούσατε να βελτιώσετε τη συσκευή Laser του πειράματος εκμεταλλεύομενοι κάπως την ιδιότητα της γωνίας Brewster;
- Σχεδιάστε το εσωτερικό του Laser He-Ne των πειραμάτων σας όπως είναι στην πραγματικότητα. Τί αλλαγές θα μπορούσατε να προτείνετε χωρίς να παραβιάζονται οι βασικές φυσικές και τεχνικές προϋποθέσεις για τη λειτουργία του;
- Στη διάταξη για την οπτική μετάδοση πληροφοριών, ποιά περιοχή συχνοτήτων διαμορφώνει τη δέσμη όταν το σήμα είναι η φωνή;
- Αν στην είσοδο MIC του Laser συνδέσετε την έξοδο μιας γεννήτριας με συχνότητα 300Hz και με κατάλληλο πλάτος, τί θα ακούγεται στο δέκτη; Αν η γεννήτρια μεταβάλλεται συνεχώς από 300-3000Hz τί θα ακούγεται;
- Πώς φαντάζεστε τη χρήση του ακροδέκτη BNC του Laser για τη μετάδοση Video (π.χ. εικόνα από μια συσκευή τηλεόρασης;)
- Πως φαντάζεστε το κύκλωμα διαμόρφωσης του Laser;
- Τί επίδραση νομίζετε ότι θα έχει στην ποιότητα λήψης η ατμοσφαιρική κατάσταση στο χώρο μεταξύ πομπού και δέκτη; Πώς μπορείτε να διαταράξετε την ατμοσφαιρική κατάσταση;
- Στη διάταξη για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός (ή τη μέτρηση αποστάσεων) υποθέστε ότι $\Delta t_0 = 0$ όταν το κάτοπτρο είναι πολύ κοντά. Τί εικόνα θα δείτε τότε στην οθόνη αν συνδέσετε τις εξόδους των ενισχυτών E_1 , E_2 (i) στο ίδιο κανάλι, (ii) στα κανάλια για οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση της δέσμης του παλμογράφου, αντίστοιχα; Υποθέστε ότι τα πλάτη των κυματομορφών είναι ίσα ή άνισα.
- Επαναλάβετε το προηγούμενο ερώτημα όταν το κάτοπτρο είναι μακριά οπότε έχετε κάποιο Δt διάφορο του μηδενός αλλά μικρό.
- Παίζει ρόλο το μήκος των καλωδίων στις μετρήσεις σας;

- Για μετρήσεις πολύ μεγάλης ακρίβειας, είναι αρκετή η σχέση $c = \text{μήκος} / \text{χρόνος}$; Τί άλλο πρέπει να ληφθεί υπόψη;
- Τί επιπτώσεις θάχει στις μετρήσεις ακρίβειας μια οποιαδήποτε διατάραξη της ατμόσφαιρας στο χώρο μεταξύ laser και κατόπτρου; Σχολιάστε με συγκεκριμένα παραδείγματα.

§7. Βιβλιογραφία

1. Κυματική, Τόμος 3 της σειράς Φυσική του Berkeley, έκδοση ΕΜΠ, 1979.
2. Κβαντική Φυσική, Τόμος 5 της σειράς Φυσική του Berkeley, έκδοση ΕΜΠ, 1979.
3. Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική, J.Millman και Χ.Χαλκιά, έκδοση ΤΕΕ, 1978.
4. *Introduction to Lasers and Their Applications*, D.C.O'Shea, W.R.Callen and W.T.Rhodes, Addison Wesley Co., 1976.